

文章编号: 1000-5862(2020)03-0221-05

# 基于力传感器的机器人变导纳控制人机交互策略

周朝政<sup>1</sup>, 叶震<sup>1</sup>, 谢叻<sup>2\*</sup>

(1. 上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海 200070; 2. 上海交通大学国家数字化制造技术中心, 上海 200030)

**摘要:** 为了实现物理人机交互中手术机器人的姿态柔顺调整, 该文提出了一种基于变导纳的机器人控制方案。人机交互操作必须对操作者非常直观, 其主要难点在于感知周围的环境与人类的意图, 并对它们做出充分、直观和安全的反应。为提高系统的直观性, 该文提出的变导纳控制策略是基于力/力矩传感器来推断操作者意图, 通过结合 UR5 机器人进行相关实验来验证该算法的性能。结果表明: 基于变导纳的机器人控制方案能够满足人机交互操作中对姿态柔顺调整的需求。

**关键词:** 人机交互; 手术机器人; 导纳控制; 算法

**中图分类号:** R 764.9; TP 391.41 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.03.01

## 0 引言

机器人已经广泛应用了几十年, 但出于安全考虑, 机器人与人类之间的直接物理交互较少。在某些特殊场合中希望利用机器人的精确性, 将它们与人类的技能结合起来, 从而更好地造福于人类。为了实现这一目标, 机器人必须能够以一种对人类操作者透明的方式跟随人类的运动。在人机交互中, 当涉及较大有效载荷时, 通常使用导纳控制策略。这种方式不需要动力学建模, 特别适合于位置控制效果较好的伺服系统。其主要难点在于如何感知周围的环境与操作者的意图, 并对它们做出充分、直观和安全的反应。解决的方法有: 1) 在机器人末端安装带有力/力矩传感器的手柄来检测操作者的意图<sup>[1]</sup>; 2) 在每个机器人关节上<sup>[2]</sup>使用扭矩传感器, 或者使用电机的电流反馈<sup>[3]</sup>来估计与环境的接触力。然而, 在复杂的应用环境中, 很难控制机器人快速灵敏地响应操作者的意图, 这导致交互的直观性较差。

为了提高物理人机交互的直观性, 相关文献提出了几种人机交互的变导纳控制策略。文献[4]提出了一种根据人类特征改变阻抗参数的方法, 首先

分析了2个人合作任务中的人的特征, 人的特性可用变阻抗模型来表示, 虚拟阻尼是根据速度在2个给定值之间进行选择。而文献[5]提出了一种评估人机交互中人手运动特性, 并将其作为阻尼器, 通过在线调整损失函数来达到最小值。文献[6]给出的虚拟阻尼是基于在线估计人手臂刚度来进行修正的。文献[7-8]提出基于在线可变阻抗控制, 将力的微分作为人类意图的自然传感器, 即获得力/力矩的时间导数, 以不同的方式来调整虚拟阻尼。

在复杂的应用环境中, 针对机器人较难快速响应操作者意图及交互直观性等难点, 本文提出了一种新变导纳控制方案来增强人机交互的直观性, 介绍了建立人机交互中变导纳控制策略模型, 讨论了算法的稳定性问题, 通过操作机器人实验获得了较好的人机交互策略模型。

## 1 导纳控制模型

现有技术中的人机交互型机器人的控制方式主要包括阻抗控制方式和导纳控制方式。其中, 阻抗控制方式是指输入位移而输出力的控制方式<sup>[9-12]</sup>, 协作机器人由于存在大惯性和摩擦力, 即使在末端装

收稿日期: 2019-06-20

基金项目: 福建省科技计划引导性(2018H0032), 泉州市科技计划(2018Z028), 上海市科委科技支撑(17441903800), 上海市科技创新行动计划(18441909000), 国家自然科学基金(61672341, 61973211, 51911540479), 上海交通大学“医工(理)交叉研究基金”(YG2017ZD03), 上海交通大学医疗机器人研究院和国家重点研发计划(2017YFB1302900)资助项目。

通信作者: 谢叻(1964-), 男, 江西南昌人, 教授, 博士, 博士生导师, 闽江学者讲座教授, 主要从事医疗机器人技术、虚拟现实技术和数字化制造技术的研究。E-mail: Lexie@sjtu.edu.cn

有力传感器的情况下,操作者也很难实现精确的运动.因此,阻抗控制通常只适合于刚性环境(如打磨抛光、货物取放等)下操作者与机器人的动态交互,却很难满足柔性环境(如医疗手术、精细雕刻等)对精度的要求.然而导纳控制方式是输入力而输出速度的控制方式<sup>[13-15]</sup>,较多地用于柔性环境中.但是,在复杂多变的柔性应用环境中,很难控制机器人快速灵敏地响应操作者的操作意图,导致机器人的动作反应慢.另外,当操作者出现失误和抖动时,现有的导纳控制方式并不能及时响应并修正操作者的失误和抖动,甚至会导致失误被连续放大,造成最终的操作结果出现很大误差,严重影响了操作精度以及操作者的使用体验.因此,本文提出一种有效的鲁棒性强的变导纳控制模型,1 维的导纳控制模型为

$$f_m = m(\ddot{x} - \ddot{x}_0) + c(\dot{x} - \dot{x}_0) + k(x - x_0),$$

其中  $f_m$  为操作者施加在传感器的力,  $m$  为虚拟质量,  $c$  为虚拟阻尼,  $k$  为虚拟刚度,  $x_0$  为平衡点位置,  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  分别表示位置、速度和加速度.为了模拟机器人的自由运动,因而将  $k, \ddot{x}_0, \dot{x}_0, x_0$  均设置为 0. 导纳模型重写为

$$f_m = m\ddot{x} + c\dot{x}.$$

所述操作力对应的期望速度进行泰勒公式展开计算得到

$$\dot{x}_d(k) = \frac{f_m(k) - c_f \dot{x}_d(k-1)}{m_f} T_s + \dot{x}_d(k-1),$$

在计算得到期望速度后,可根据所述期望速度计算得到所述期望加速度,计算公式为

$$\ddot{x}_d(k) = (f_m(k) - c_f \dot{x}_d(k-1)) / m_f,$$

其中  $k$  为采样时刻,  $f_m(k)$  为  $k$  时刻的操作力,  $\dot{x}_d(k)$  为期望速度,  $\ddot{x}_d(k)$  为期望加速度,  $T_s$  为采样时间,  $\dot{x}_d(k-1)$  为所述机器人的当前运行速度;  $c_f$  为所述预设虚拟阻尼;  $m_f$  为所述预设虚拟质量.图 1 为人机交互控制策略示意图,采用比例控制器作为速度控制器的控制方案.

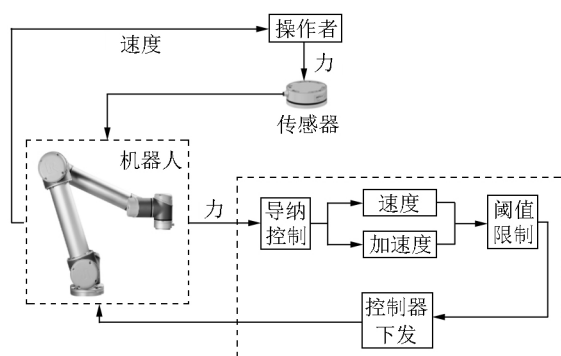


图 1 人机交互控制策略

## 2 变导纳控制策略

以速度为状态量,将前述的 1 阶导纳方程进行拉普拉斯变换,可得到如下变换后的状态方程

$$\dot{X}_d(S) = F_m(S) H(S), \quad (1)$$

其中  $H(S) = P/(QS+1)$ ,  $H(S)$  为导纳传递函数,虚拟阻尼  $c$  的倒数  $P = 1/c$  以及虚拟质量与虚拟阻尼之比  $Q = m/c$  决定了  $H(S)$  的值;其中虚拟阻尼  $c$  影响系统响应的稳定状态值,而虚拟质量与虚拟阻尼之比  $m/c$  影响系统的动态性能.即虚拟阻尼  $c$  影响响应的稳态值,而虚拟质量与虚拟阻尼比  $m/c$  影响整个机器人系统的动力学性能(它改变了 1 阶系统的极值).若导纳参数(虚拟质量和虚拟阻尼)被设置为高值,通常需要一个更大的操作力以给定的速度或加速度来移动机器人,则机器人更容易执行精细的动作,因为此时机器人的反应性较弱,人机交互顺畅.若导纳参数被设置为低值,则更容易以高的速度或加速度来移动机器人,但难执行精细的动作.

变导纳控制策略的目的就是根据人的意图来实时改变导纳参数.文献[4-5]获得了对特定任务下的导纳参数;文献[7-8]利用力对时间的导数来推断操作者的意图,然而这个方法不能很好地推断操作者意图.比如,力对时间导数小于 0 意味着减少相应的加速度而不是减速;此外,实际中测得力对时间的导数会引入非常大的噪声.以上文献都只针对改变虚拟阻尼的值而保持不变虚拟质量的值的情形进行了研究.

本文做了如下研究:1) 提出机器人变导纳控制方案来推断操作者的意图,并相应地实时调整机器人系统的导纳参数;2) 讨论算法的稳定性问题以及导纳算法模型;3) 基于 UR5 机器人进行相关实验,结合实验结果验证变导纳算法的性能.

### 2.1 变导纳控制算法稳定性

根据文献[10]实验表明:机器人系统呈现出的虚拟质量存在一个最小的临界值.若机器人的虚拟质量小于最小临界值,则当操作者与刚性环境交互时,可能会发生振动或不稳定;不存在机器人系统最大的虚拟质量,而最小虚拟质量依赖于硬件设备,如机器人系统的动力学、摩擦力、传动机构和电机等.

通过实验测试机器人沿着  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴运动,可得到不同虚拟阻尼与最小虚拟质量关系曲线(见图 2).在各曲线以下区域表示机器人运动平稳,而在曲线上方表示操作者能感觉振动.在测试最小虚拟质量的实验中,关注的重点是让机器人在运动过程

中不发生振动.实验发现当虚拟阻尼低于  $60 \text{ Ns} \cdot \text{m}^{-1}$  时机器人很难呈现快速的动力学特性.而且随着虚拟阻尼增大, $Q$  值存在一个极值.相比  $X$  和  $Y$  轴方向,沿着  $Z$  轴方向运行的约束较大(大惯量).

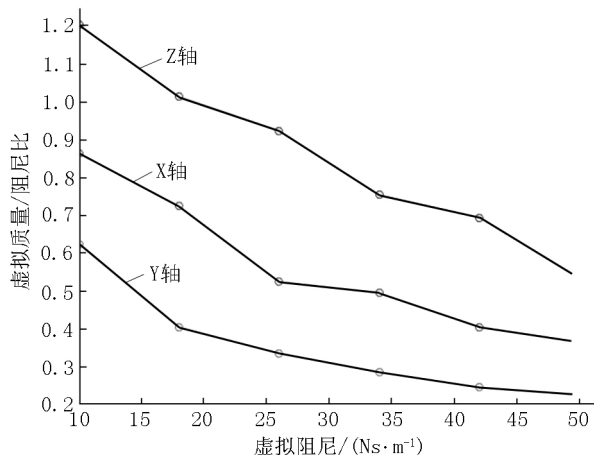


图2 沿着  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴运动机器人的稳定性

## 2.2 变量导纳参数及调参

为了介绍如何根据推断操作者意图来调整机器人的导纳参数,本文先对操作者意图做了简单的推理,然后给出了获得相应导纳参数和在线调节参数的方法.

首先,知道在手术情况下,考虑3种可能的操作

意图:加速、停止及反向.本文只考虑加速与停止情况,反向可看作是停止后再加速运动.1)若操作者想要加速,则期望的加速度将与所期望的速度方向一致.为了帮助操作者加速,虚拟阻尼和虚拟质量应根据所需加速度的大小而降低;2)若操作者想要停止,则期望的加速度将与期望速度的方向相反,虚拟阻尼应该增加而同时降低虚拟质量;3)若操作者想要反转方向,则就会有2个阶段:先减速(直到速度达到0),然后是反向加速.若质量和阻尼低,则这种机动通常会更容易,这取决于初始条件和最终条件.若所需加速度与所需速度方向相反,则为减速阶段.

基于以上的讨论,对于如何改变导纳参数(当操作者想要停止及操作者想要反转方向时)存在一个矛盾.在减速阶段情况下,虚拟阻尼应该增加;而在反向加速时虚拟阻尼应该减少.为此,可分析相互作用力的大小区分(若操作者想停止,则力一般应该更小).然而,这种区分在实际中比较困难,对于手术应用来说,停止操作比反向更重要.若操作者想要反转方向,则虚拟阻尼将在减速阶段中增加停止设备,然后在加速阶段中减少虚拟阻尼以加速设备.根据能量池理论,速度、加速度的值存在对应的阈值.图3为用于推断人意图的策略.

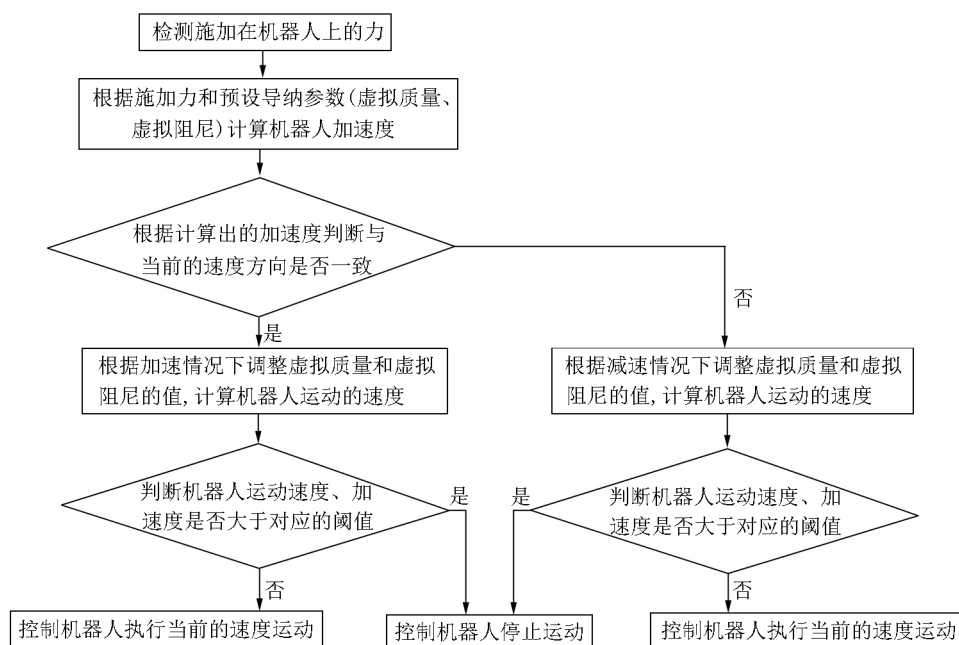


图3 用于推断操作者意图的策略

其次,在计算或调节机器人导纳参数之前,需要设定初始状态下的默认导纳参数值.在低速情况下,将设置机器人导纳参数为默认参数值.在需要机器人进行精确操作情况下,设置高阻尼参数;而在需要快速操作时,设置低质量参数,但不能低于临界值.

理论上应该使得机器人在各个方向上的动力学特性一致,这就会使得导纳参数的各个方向不同.在此实验中,在  $Z$  轴方向上设置较大的约束.

基于上述讨论,虚拟阻尼的值与加速度值相关,即当机器人加速时减小虚拟阻尼;相反地,当机器人

减速时增大虚拟阻尼的值. 虚拟阻尼与加速度的关系可表示为

$$c_a = c_f - k_c (c_f - c_{\min}) |\ddot{x}_d| / |\ddot{x}_d|_{\max}, \quad (2)$$

$$c_d = c_f + k_d |\ddot{x}_d| (c_{\max} - c_f) / |\ddot{x}_d|_{\max}, \quad (3)$$

(2) 式与 (3) 式分别获得加速下的虚拟阻尼  $c_a$  和减速下的虚拟阻尼  $c_d$  的值; 其中  $c_f$  为默认虚拟阻尼  $c_{\max}$  与  $c_{\min}$  分别为预设的最大和最小虚拟阻尼;  $\ddot{x}_d(k)$  为所述期望加速度,  $|\ddot{x}_d|_{\max}$  为预设的最大加速度;  $k_c$  与  $k_d$  分别为在加速、减速时的增益因子.

若改变虚拟阻尼而保持不变虚拟质量, 系统会产生负面影响. 如在加速过程中, 由 (1) 式可知, 通过减小虚拟阻尼获得的增益将削弱, 因为  $Q$  值增大, 响应也会更慢; 同理在减速过程中,  $Q$  值减小而虚拟阻尼增加. 因此, 若机器人系统处在加速阶段, 则同时减少虚拟阻尼和虚拟质量, 但为了保持一致的加速动态性能而保持恒定的  $Q$  值; 而在减速阶段, 理想状态下应增加虚拟阻尼而减小虚拟质量, 但需要保持减速连续性.

因此, 同时改变虚拟阻尼与虚拟质量值可提供更好的柔顺性. 虚拟质量与虚拟阻尼的关系表示为

$$m_a = m_f c_a / c_f, \quad (4)$$

$$m_d = m_f (1 - \gamma (1 - \alpha \ln(\beta (c_f - c_d)))) / c_f. \quad (5)$$

(4) 式与 (5) 式分别获得加速下的虚拟质量  $m_a$  和减速下的虚拟质量  $m_d$  的值; 其中  $\gamma$  为动态性能因子  $\beta$  为平滑度因子  $\alpha$  为在减速时的增益因子.

最后, 通过对操作者进行测试获得相关参数. 尽管该参数可通过拟合数据获得, 但让操作者来调节导纳参数通常会更重视获得最好的结果. 故可利用机器人进行拖拽实验及加速实验, 在实验过程中对导纳参数进行监测, 使其在选取过程中, 让速度与加速度的值在预先设定的阈值内.

### 3 实验与验证

本实验采用丹麦优傲机器人公司生产的 UR5 机器人, 可提供 6 自由度的协作机器人. 机器人净重 18.4 kg, 最大载荷为 5 kg, 机器人最大操作空间为 850 mm. 控制器采用德国倍福公司生产的 CX2030 控制器, 采样频率为 1 000 Hz. 力传感器采用的是 ATI 工业自动化公司生产的 Axis80 EtherCAT F/T 传感器. 在实验前预设 UR5 机器人默认的导纳参数值, 预设虚拟质量  $m_f$  的取值为 10 kg, 默认虚拟阻尼

的取值为  $30 \text{ Ns} \cdot \text{m}^{-1}$ ; 低速运动的速度取值为  $0.001 \sim 0.020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 高速运动的速度取值为  $0.100 \sim 0.150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

为了验证变导纳算法的有效性, 对机器人系统进行了画圆跟随实验 (见图 4). 1) 实验从 A 点开始, 加速直线前进至 B 点, 然后沿着圆弧运动至 C 点, 而后减速运动至 D 点; 2) 沿圆弧 EF 加速运行至 F 点, 减速运动至 G 点停止. 随机选取了 10 位操作者进行实验, 对不同的导纳参数进行测试; 每个测试者进行 3 次画圆跟随实验, 分别记录完成操作任务时间、机器人速度、操作轨迹与原始轨迹.

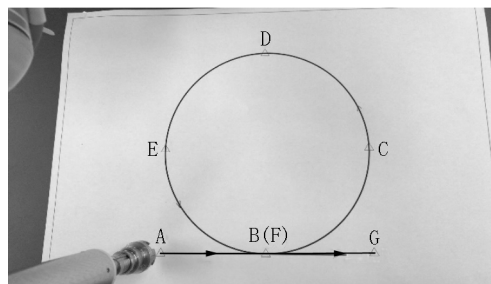


图 4 画圆跟随实验

图 5 为跟随实验的操作时间和测得机器人沿 X、Y 及 Z 轴的速度值. 从图 5 可看出, 操作者完成的平均时间在 6 d 内, 沿 X 和 Y 轴的运动速度和预期测试效果一样, 而在 Z 轴方向上波动很小 (平面内画圆). 理论上在低导纳的情况下容易加速, 速度变化较快但很难完成精细动作; 而在高导纳的情况下很容易进行精细的运动, 而加速度运动需要很大的力. 在变导纳参数实验中, 机器人加速和精细操作都很容易; 对于大加速度值, 采用变导纳方案得到的速度和加速度与低导纳参数下得到的速度和加速度相似, 有利于操作者加速. 然而, 执行精细移动的能力仍然存在, 因为此时导纳参数将接近设置的默认值. 随着导纳参数的变化, 速度衰减较快, 这是由变导纳控制引起的加速度较大所致.

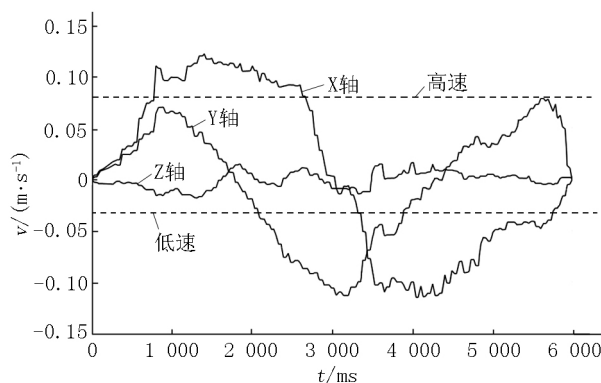


图 5 画圆跟随试验中 X、Y 及 Z 轴的速度变化曲线

图6为画圆实验中实际曲线与测试曲线轨迹对比分析图。在Matlab中将实际轨迹与测试轨迹匹配到同一坐标系下,然后依次测得所需点的误差。从图6可知,跟随实验的轨迹与原始实际轨迹相差较小,依次测量A~G点和圆心点位置的均方差。A~G点的均方差为1.7117 mm;圆心点位置的均方差为1.123 mm,测得E点的最大误差为2.212 mm。

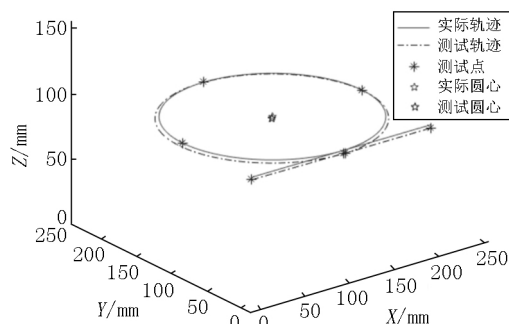


图6 画圆实验中实际曲线与测试曲线轨迹

## 4 结论

本文提出了一种基于变导纳的机器人控制方案,其目的在于通过操作者意图来实现机器人柔顺控制,提高系统的直观性。通过结合UR5机器人进行相关实验,实验结果表明:本文提出的人机交互策略能够较好地响应操作者的控制意图,具有良好的柔顺性及可控性,能够满足人机交互操作中对姿态柔顺调整的需求。

## 5 参考文献

- [1] Colgate J E, Peshkin M, Klostermeyer S H. Intelligent assist devices in industrial applications: a review [C]// Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nevada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2003 3: 2516-2521.
- [2] 潘新安,王洪光,姜勇.一种机器人谐波减速器内嵌扭矩传感器的研制[J].仪器仪表学报,2014,35(1): 154-161.
- [3] Kobayashi S, Muis A, Ohnishi K. Sensorless cooperation between human and mobile manipulator [C]// IEEE International Conference on Industrial Technology. Hong Kong: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2005: 811-816.
- [4] Ikeura R, Inooka H. Variable impedance control of a robot for cooperation with a human [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 1995 3: 3097-3102.
- [5] Ikeura R, Moriguchi T, Mizutani K. Optimal variable impedance control for a robot and its application to lifting an object with a human [C]// Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Berlin: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2002: 500-505.
- [6] Tsumugiwa T, Yokogawa R, Hara K. Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D C: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2002 1(1): 644-650.
- [7] Duchaine V, Gosselin C M. General model of human-robot cooperation using a novel velocity based variable impedance control [C]// Proceedings of the Second Joint Euro Haptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Tsukuba: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2007: 446-451.
- [8] Tsumugiwa T, Yokogawa R, Hara K. Variable impedance control with regard to working process for man-machine cooperation-work system [C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Maui H I: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2001 3: 1564-1569.
- [9] 张立勋,杨勇,张今瑜,等.手臂康复机器人阻抗控制实验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2008,29(1): 69-72,84.
- [10] 徐国政,宋爱国,李会军.基于模糊逻辑的上肢康复机器人阻抗控制实验研究[J].机器人,2010,32(6): 792-798.
- [11] 路明,赵忆文,姜运祥.脊柱微创主从式手术机器人阻抗控制系统研制[J].机器人,2017,39(3): 371-376.
- [12] 杨振.机器人阻抗控制算法的参数调整研究[J].枣庄学院学报,2008,25(2): 89-93.
- [13] 毛大超.脊柱手术机器人力摆位及磨削力控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017: 26-35.
- [14] 李军强,齐恒佳,张改萍,等.基于力信息的人机协调运动控制方法[J].计算机集成制造系统,2018,24(8): 2005-2011.
- [15] 杜志江,王伟,闫志远,等.基于模糊强化学习的微创外科手术机械臂人机交互方法[J].机器人,2017,39(3): 363-370.

(下转第234页)

- vascular interventional surgery robot [J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 2010 6(2): 194-201.
- [9] Guo Jian ,Guo Shuxiang ,Shao Lin ,et al. Design and performance evaluation of a novel robotic catheter system for vascular interventional surgery [J]. Microsystem Technologies 2016 22(9): 2167-2176.
- [10] Kumar M ,Vandana P ,Patel V. Two degree of freedom PID controller for speed control of DC motor [J]. American International Journal of Research in Science ,Technology , Engineering and Mathematics 2015 ,10( 1) : 94-98.
- [11] 谢叻 ,神祥龙 ,吴朝丽 ,等. 具有力反馈的心血管介入虚拟手术模拟器的研发 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2017 41( 4) : 331-337.
- [12] 叶思航 ,谢叻 ,王海鹏 ,等. 基于 3 维动作捕捉的下肢骨折术后步态分析 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2018 42( 5) : 507-511.
- [13] 周朝政 ,谢叻. 微创人工耳蜗手术导航匹配算法研究 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2017 41( 4) : 344-347.

## The Research on the Control of the Minimally Invasive Surgery Robot for Vascular Intervention

XIANG Yujia<sup>1</sup> ,XIE Le<sup>1,2\*</sup>

( 1. Institute of Medical Robot ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai 200240 ,China;

2. Quanzhou Normal University ,Quanzhou Fujian 362000 ,China)

**Abstract:** Real-time X-ray image guidance is necessary for the process of vascular interventional surgery ,but long-term radiation exposure becomes a severe issue threatening surgeon's health. In order to reduce the radiation injury , a minimally invasive surgery robot system based on double-master-hand control is introduced ,and its overall framework and control method are mainly studied. Surgeon operates the interactive interface of the upper computer ,and drive the actuator to complete the interventional operation through master-slave remote control. Finally ,a model experiment is carried out to prove that the robot has the function of multi-instrument collaborative delivery.

**Key words:** vascular intervention; master-slave control; teleoperation; multi-instrument cooperation

( 责任编辑: 王金莲)

( 上接第 225 页)

## The Human-Robot Interaction Strategy of Robot Variable Admittance Control Based on Force Sensor

ZHOU Chaozheng<sup>1</sup> ,YE Zhen<sup>1</sup> ,XIE Le<sup>2\*</sup>

( 1. Shanghai Electric Central Research Institute ,Shanghai 200070 ,China;

2. National Digital Manufacturing Technology Center ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai 200030 ,China)

**Abstract:** In order to realize the flexibility and adjustment of the posture of surgical robot in the physical human-robot interaction ,a control scheme based on variable admittance is proposed. Human-robot interaction should be very intuitive to the operator. It is particularly difficult in perceiving the surrounding environment and human intentions. However ,the interaction should be adequate ,intuitive and safe. In order to improve the system's intuitiveness , the variable admittance control proposed is based on force/torque sensor to infer the operator's intention ,and the performance of this algorithm is verified by relevant experiments combined with UR5 robot. The results show that the robot control scheme based on variable admittance can meet the requirements of flexible attitude adjustment in human-robot interaction.

**Key words:** human-robot interaction; surgical robots; admittance control; algorithm

( 责任编辑: 王金莲)